ChinaXiv合作期刊

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

chinaXiv:202110.00040v1

喀喇昆仑山乔戈里峰北坡主要冰川运动特征

李海娟， 刘时银， 吴坤鹏

（云南大学国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650500）

摘 要：利用ITS_LIVE数据、Landsat数据提取了喀喇昆仑山北坡42条冰川的表面流速。将末端运动与表面运动特征结合起来，分析对比了不同运动类型冰川表面流速的时空变化。结果表明：(1) 1989—2018年，研究区42条冰川中，存在稳定冰川16条、前进冰川6条、退缩冰川1条、跃动冰川19条。空间上，流速分布符合冰川运动一般原理，可在积累区和冰舌上部发现明显的高值区域，这些区域多出现在跃动冰川主干或支部，流速大小一般在100.00 m·a^{-1}之上，如在音苏盖提冰川南分支，其最大流速可达到358.33 m·a^{-1}。(2) 冰川流速分布与地形要素的关系密切。流速在海拔4600~5000 m之间达到最大(54.55 m·a^{-1})，是冰川末端流速的10倍以上；分布在坡度0~5°之间的42条冰川平均流速最大，并且随着坡度的增大，流速逐渐减小；处于东向的冰川流速最大，处于西南向的流速最小。(3) 稳定冰川流速年际变化较稳定，不同年份相同位置的流速值较一致；而对于前进冰川和退缩冰川而言，年际流速波动均较大；跃动冰川不同位置年际流速变化不同。末端发生前进的跃动冰川表面流速变化不大，但末端变化速度却可超过100.00 m·a^{-1}，甚至可达到500.00 m·a^{-1}。(4) 长度更长、面积更大的冰川易发生跃动。气候、雪崩和地形也是影响冰川运动速度变化的主要原因。

关 键 词：冰川；喀喇昆仑山北坡；ITS_LIVE数据；Landsat数据；表面流速；时空变化

文章编号：

冰川是冰冻圈系统的重要组成部分，同时也是气候变化指示器[1-2]。冰川变化受气候变化控制，并对气候变化作出快速响应，主要造成冰川积累量与消融量的变化而引起冰川高度和冰川运动的变化，最终表现在冰川面积、长度等发生变化[1]。因此，研究冰川变化对区域乃至全球性气候变化具有重要意义[3-5]。冰川运动是冰川的一个重要变化特征，反映了冰川在内外环境综合作用下的动态变化信息[6]。基底滑动与底部沉积层变形造成的运动构成了冰川的主要运动形式[7]。国际上，冰川研究起步早，多集中在极地冰盖与海洋性冰川[8]。我国冰川运动观测研究起步较晚，研究主要集中在天山[9]、祁连山[10-11]、喜马拉雅山[12-16]、横断山[17]、喀喇昆仑山[18-20]等地区部分冰川[7]。井哲帆等[6]利用通径分析方法发现，冰川形态、物质平衡、气候条件等对冰川运动速度均有影响，强弱不一，但冰川面积与厚度对运动速度影响最为显著。

冰川运动特征变化与冰川物质平衡变化存在一定的因果关系[1]。在全球气候变暖背景下，青藏高原冰川整体呈退缩趋势，物质平衡呈负。但由于受局部冰川气候条件影响，出现了有些地区冰川物质平衡呈正的现象，影响了冰川运动特征[21]。Hewitt等[21]提出“喀喇昆仑异常”，发现喀喇昆仑山一些地区存在冰川停滞和前进现象。Rankl等[22]指出喀喇昆仑山冰川正的物质平衡造成了冰川末端的稳定和前进，而周边区域出现冰川后退和减薄。许艾文等[23-24]利用遥感技术对喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化进行了监测与研究，发现冰川退缩速率由快至慢，并存在大量前进与跃动冰川，造成了冰川面积的扩张。目前，冰川异常运动的机理尚不

收稿日期：2020-10-12； **修订日期**：2021-03-05

基金项目：第二次青藏科考项目(2019QZKK0208)；云南大学人才项目(YJRC3201702)

作者简介：李海娟(1995-)，女，硕士研究生，主要从事冰川遥感研究. E-mail: 12018001101@mail.ynu.edu.cn

通讯作者：刘时银(1963-)，男，博士，教授，主要从事冰冻圈与水循环研究. E-mail: shiyin.liu@ynu.edu.cn

ChinaXiv合作期刊

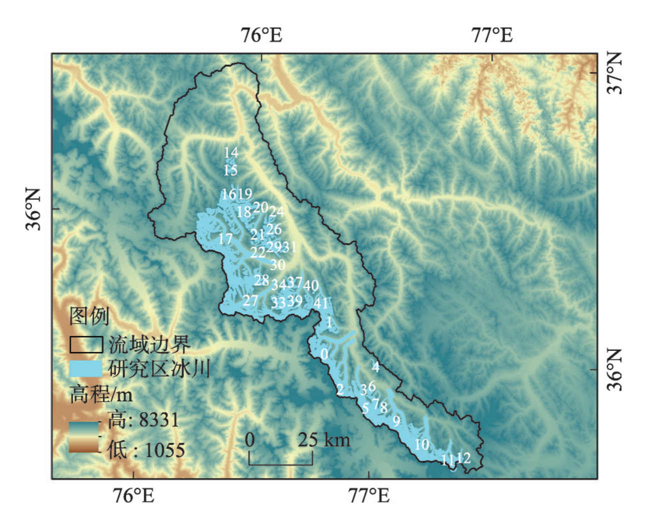
chinaXiv:202110.00040v1

清楚，但影响最大的因素是受热调节而不是水文控制[25]。Quincey等[26]指出喀喇昆仑山有跃动冰川存在，不完全符合热力学和水文控制，最大的差别之处在于冰川基础条件不同。Farinotti等[27]指出喀喇昆仑山异常现象是否会继续持续尚不确定，但鉴于目前对未来气候的预测所预期的大幅升温，这种异常现象长期持续下去似乎不太可能。

喀喇昆仑山冰川发育广泛。关于喀喇昆仑山冰川研究也较多，其北坡异常的扩张现象引起了学者们广泛的关注。不少学者研究该区不同流域的冰川面积、长度与物质平衡状态，但对其表面运动研究不够全面[20,28-30]，且未进行连续观测，并缺乏对不同末端变化的冰川表面运动的变化特征及其影响因素的监测。鉴于此，本文通过研究冰川运动与其表面地形之间的关系为认识该地冰川异常现象提供资料，完善该区冰川运动监测。

1 研究区概况

喀喇昆仑山北坡大致在75°35′~77°00′E和35°31′~36°49′N（图1）。据中国第二次冰川编目，该地区的冰川编码为“5Y654”，流域面积为8223 km²。喀喇昆仑山主山脊海拔在7000~8000 m之间[31]。该区现代冰川发育的山脉，平均高度均在5730 m以上，主峰乔戈里峰海拔为8611 m。海拔最高的冰川为乔戈里冰川，高程为8569 m，其余冰川



注：图中数字0~41代表冰川序号。

图1 喀喇昆仑山北坡冰川概况图

Fig. 1 Glacier profile of the north slope of Karakoram Mountains

位于海拔3979~8569 m之间，平衡线大致位于5100~5400 m之间[32]。与周围冰川地理性质比较，该区冰川由复合型向大陆型过渡[31]。流域内音苏盖提冰川是中国面积最大的冰川[23]。

喀喇昆仑山北坡气候受亚洲季风影响，80%的降水是由夏季降水贡献。冬季受西风环流控制，2/3的降雪发生在高海拔处[22]。在谷地中年降水量不足100 mm，但随海拔升高，降水量逐渐增加。雪线处，夏季平均气温为1.2~3.0 ℃，年降水量在500 mm以上[33]。冰川物质主要来源于雪崩，雪崩供给了冰川表碛[22]。本文根据冰川规模、大小、形态选取了42条冰川作为研究区（图1）。

2 数据与方法

2.1 数据来源

Landsat数据来源于地理空间数据云网站（http://www.gscloud.cn/），影像行列号为148/35，主要由1989—2018年的Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+和Landsat 8 OLI数据组成（表1）。研究所采用的产品级别为Level L1T数据，均经过几何校正、辐射校正和基于地表数字模型的地形校正[34]。该区海拔高，降雪丰富，云多雾多，且有冰碛物覆盖，造成解译困难。因此，本研究尽可能选取夏、秋季云雾雪覆盖较少的影像。

ITS_LIVE数据（The inter-mission time series of land ice velocity and elevation）产品是一组主要冰川的年度平均地表速度的区域汇编，时间跨度为1985—2018年。下载地址https://its-live.jpl.nasa.gov。它是NASA“研究环境制作地球系统数据记录2017”项目的一部分，其展示的地表速度是使用Gardner等[35]描述的自动裂缝特征跟踪处理链的方法从landsat 4、5、7和8图像获得。数据分辨率为240 m。本文选取1990—2018年流速数据来研究冰川表面运动。

此外，数字高程模型（DEM）数据是来源于地理空间数据云的ASTER GDEM数据，分辨率30 m。下载地址（http://www.gscloud.cn/search）。该数据主要用来提取研究区地形参数（高程、坡度、坡向等）。Sam等[15]和张莎莎等[19]已研究过该数据的可靠性，并成功应用于喜马拉雅地区和喀喇昆仑山西部冰川的研究。另外，本文用到了第二次冰川编目数据、中国行政区矢量数据。

ChinaXiv合作期刊

表1　遥感影像数据列表

Tab. 1　List of remote sensing image data

序号	日期(年-月-日)	传感器	云量	序号	日期(年-月-日)	传感器	云量
1	1989-11-17	TM	10.18	14	2004-08-14	ETM+	1.30
2	1992-11-25	TM	18.74	15	2005-09-02	ETM+	6.94
3	1991-08-19	TM	18.87	16	2006-10-07	ETM+	2.72
4	1993-07-07	TM	1.00	17	2007-04-17	ETM+	2.67
5	1994-06-24	TM	5.21	18	2008-06-06	ETM+	1.99
6	1996-09-01	TM	17.60	19	2009-08-12	ETM+	1.84
7	1997-07-18	TM	0.83	20	2010-10-18	ETM+	2.77
8	1998-04-16	TM	0.00	21	2011-08-02	ETM+	31.64
9	1999-01-13	TM	0.00	22	2013-10-10	ETM+	2.17
10	2000-06-16	TM	2.00	23	2014-06-15	OLI	8.84
11	2001-05-18	TM	2.00	24	2015-01-09	OLI	11.20
12	2002-10-12	TM	3.00	25	2016-09-24	OLI	13.38
13	2003-05-08	ETM+	2.00	26	2018-04-07	OLI	2.75

chinaXiv:202110.00040v1

2.2　研究方法

2.2.1　冰川边界提取与精度评估方法　很多计算机数据处理软件提供了多种自动或半自动提取冰川边界的方法，但这些方法的应用在精度方面仍受到很大的限制。比如有阈值统计法、非监督分类和监督分类、主成分分析法、面向对象的信息提取法、比值阈值法等[36-38]。其中，比值阈值法可以在地学处理软件ENVI中进行，原理简单、提取结果较准确，尽管其对冰川表碛的识别较差，但仍然是目前应用最多且可信度最高的冰川提取分类方法[39-40]。本研究发现，比值阈值法受到影像质量、冰碛物遮挡、视觉判断误差等因素的影响很大，因此基于2次冰川编目数据以及1989—2018年遥感影像，借助Google Earth采用目视解译提取冰川边界。冰川边界精度主要受传感器和图像配准误差的影响。本文仅考虑遥感影像空间分辨率造成的误差[41]，可由下式计算得出：

$$\varepsilon = N \times A \tag{1}$$

式中：ε为影像空间分辨率造成的冰川面积误差（km^2）；N为冰川轮廓的周长（km）；A为半个像元的边长（Landsat TM/ETM+/OLI为15 m）（m）。结果表明，ε求和为39.27 km^2，占2018年总面积的2.7%，其他年份的冰川边界精度也是2.7%，精度满足要求。

2.2.2　冰川流速误差评估方法　误差评估方法最为精准的是进行实验数据与实测数据的对比验证，但喀喇昆仑山的冰川海拔高、地势险要，受自然条件的限制，长期以来难以大面积的进行实地测量。且受影像配准、云雪质量、冰面光滑、冰川表碛物识别、ETM影像修复、冰川边界提取不确定性等的影响，导致计算的不同时期间隔的位移量相关性不好，影响一定的估算精度，可采用静止的山峰等物体位移为0的非冰川区为基准，评估估算精度[34]。为此，本文以2018年为例，根据遥感冰川运动估算的基本原理，利用非冰川区残余位移对冰川表面运动监测结果开展了精度分析[19]其详细公式如下：

$$e_{\mathrm{off}} = \sqrt{\mathrm{MED}^2 + \mathrm{SE}^2} \tag{2}$$

式中：e_{off}为非冰川区偏移量的误差；MED为非冰川区偏移量的平均值；SE为非冰川区偏移量的标准误差，其具体计算公式如下：

$$\mathrm{SE} = \frac{\mathrm{STDV}}{\sqrt{N_{\mathrm{eff}}}} \tag{3}$$

式中：STDV为非冰川区偏移量平均值的标准差；N_{eff}为空间非相关像元个数，其计算公式如下：

$$N_{\mathrm{eff}} = \frac{N_{\mathrm{total}} \times \mathrm{PS}}{2D} \tag{4}$$

式中：N_{total}为非冰川区像元的总数；PS为像元分辨率（m）；D为空间相关的最大距离（m），空间相关的最大距离一般是像元分辨率的20倍。由此可得非冰川区偏移量的误差为1.413 $m \cdot a^{-1}$，远小于冰川的速度观测值。

2.2.3　冰川类型识别　喀喇昆仑山北坡42条冰川有81%被表碛覆盖，使得冰川边界的识别成为一大困难[42]。利用Landsat系列影像和冰川编目数据绘

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202110.00040v1

制冰川末端来决定冰川是否前进、稳定或退缩[22]。按照Rankl等[22]提出的定义：以2个像元大小为标准，判断冰川末端前进与否。当冰川末端前进超过60 m时为前进冰川；冰川末端退缩超过60 m时为退缩冰川；否则为稳定冰川[43]。对于跃动冰川的识别，可根据其末端变化、表面流速、表面特征（如裂隙、冰面明显的中碛褶皱、冰面的破碎）、末端增厚识别[22,44]。一般而言，跃动冰川冰流速度超出平静期10倍以上[44]，往往造成末端突然前进和冰川上部的减薄[45]。目前，关于具体区分跃动冰川与非跃动冰川还没有明确的定义。并且跃动与前进冰川存在一定的区别[46]。一般认为，末端速度大于100.00 m·a^{-1}的前进冰川、表面流速大于100.00 m·a^{-1}的冰川可归为跃动。冰川末端速度可根据2期冰川末端长度变化获取，冰川长度的获取需要获取冰川中流线，冰川中流线长度即冰川长度。冰川中流线可在ArcGIS中通过半自动提取获得。具体方法是基于冰川边界和DEM提取冰川最高点到冰川最低点的中心线[47-48]。

3 结果与分析

3.1 冰川分类结果

基于1989—2018年遥感影像图，根据冰川末端变化识别了21条前进冰川、20条稳定冰川、1条退缩冰川。1989—2000年发生前进的冰川有8条，发生退缩的冰川有2条；2000—2010年发生前进的冰川有14条，发生退缩的冰川有3条；2010—2018年发生前进的冰川有13条，退缩冰川2条，其余冰川保持稳定。在1989—2018年期间，存在稳定冰川16条、前进冰川6条、退缩冰川1条、跃动冰川19条，其中仍未停止前进的冰川有4条。末端前进速度大于100.00 m·a^{-1}的冰川有11条；前进速度大于200.00 m·a^{-1}的有8条；前进速度大于300.00 m·a^{-1}的有8条。前进期短则1 a，长则24 a，发生前进的时间主要集中在近10 a。跃动冰川分布在前进冰川、退缩冰川、稳定冰川中。根据冰川表面特征与流速变化识别了19条跃动冰川。其中，冰川末端发生前进的跃动冰川有12条。图2为不同类型冰川的空间分布。

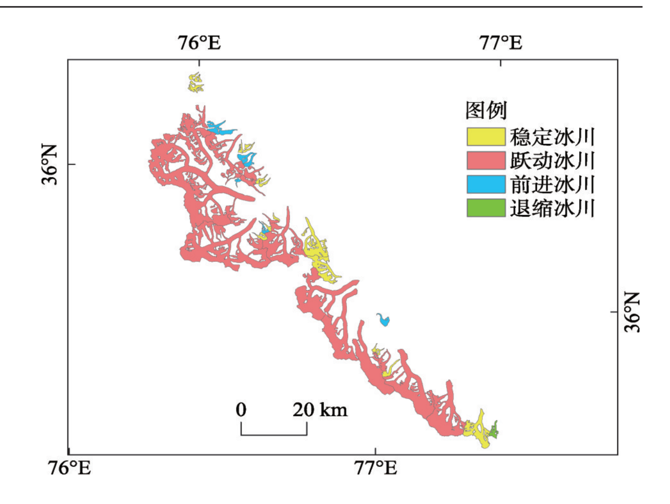


图2 跃动冰川、前进冰川、退缩冰川和稳定冰川的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of surging glacier, advancing glacier, retreating glacier and stable glacier

3.2 冰川运动特征

3.2.1 冰川表面运动速度空间分布特征 本研究基于美国雪冰中心的ITS_LIVE数据对喀喇昆仑山北坡42条主要冰川流速做了全范围的估算，得到了1990—2018年流速的空间分布情况（图3）。以2018年为例，分析研究区不同状态的冰川运动特征。研究得到：跃动冰川年平均流速介于1.38~38.8 m·a^{-1}之间，平均流速为14.62 m·a^{-1}；前进冰川流速介于1.11~9.04 m·a^{-1}之间，平均流速为4.32 m·a^{-1}；稳定冰川流速介于0.64~7.9 m·a^{-1}之间，平均流速为3.12 m·a^{-1}；退缩冰川流速为3.54 m·a^{-1}。显然，跃动冰川流速大于其他3类冰川流速。在空间上，流速分布符合冰川运动一般原理[31]，可在积累区和冰舌上部发现明显的高值区域，这些区域多出现在跃动冰川主干或支部，流速大小一般在100.00 m·a^{-1}之上，如音苏盖提冰川南分支，其最大流速可达到358.33 m·a^{-1}。单条冰川平均流速分布最大的冰川为9号冰川（38.80 m·a^{-1}），分布最小的为32号冰川（0.64 m·a^{-1}）。

冰川流速的空间分布与高程关系密切。研究区冰川海拔处于3800~8600 m，我们将海拔以每隔400 m分段，得到2018年不同高程区间的冰川平均流速（图4）。结果显示：随着海拔升高，冰川流速逐渐升高后下降。在海拔3800~4200 m之间，冰川流速为3.21 m·a^{-1}，是顶部8200~8600 m区间流速的2倍；接着，随着海拔升高，冰川流速从3.21 m·a^{-1}升高到54.55 m·a^{-1}后逐渐减小至1.58 m·a^{-1}，在海拔4600~5000 m之间，流速达到最大（54.55 m·a^{-1}），是冰川末端流速的10倍以上；到达5000 m以后，流速逐渐减小，在7000 m以后，冰川运动最慢。

冰川运动还与坡度、坡向等有关。坡度分布在0~5°之间的42条冰川平均流速最大，并且随着坡度

ChinaXiv合作期刊

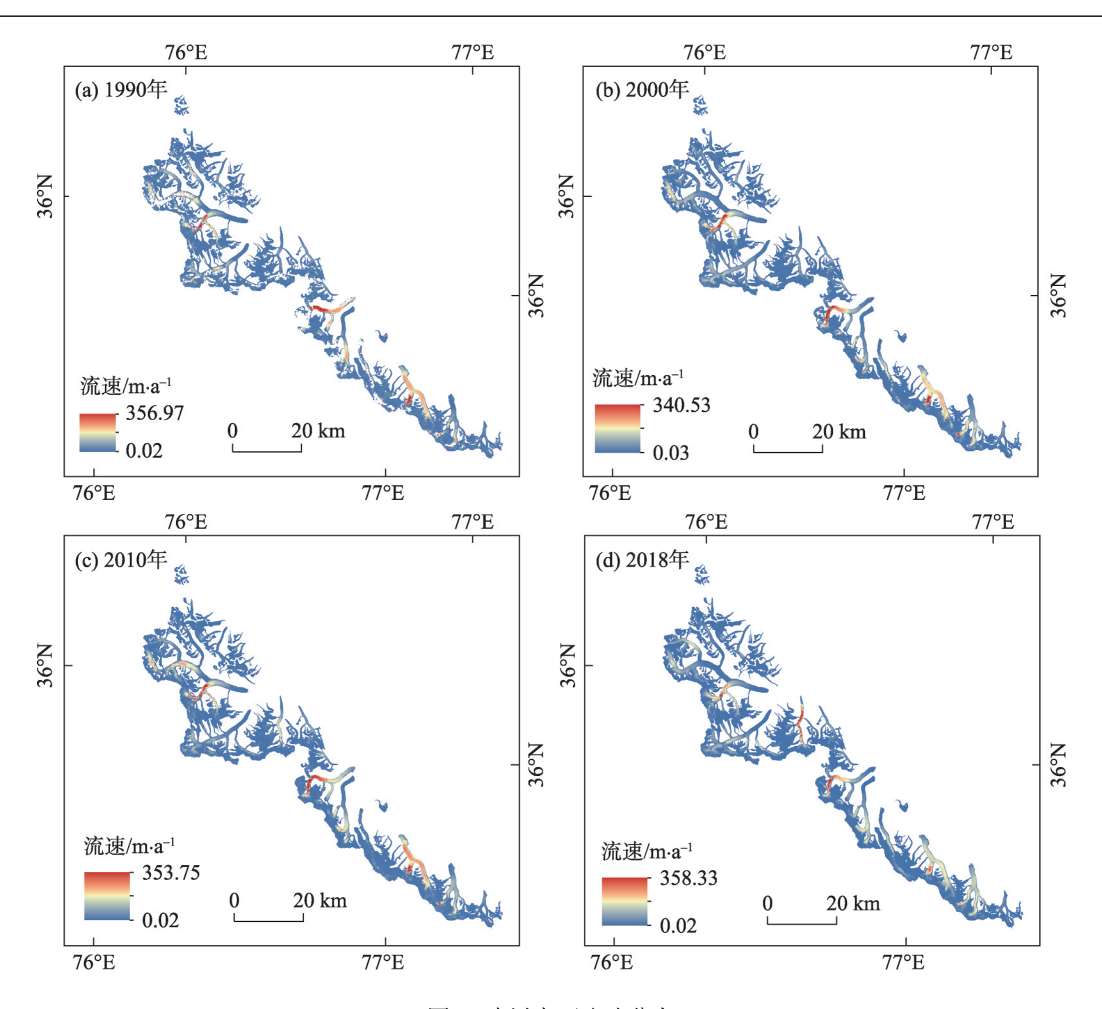


图3 冰川表面流速分布

Fig. 3 Surface velocity profile of glaciers

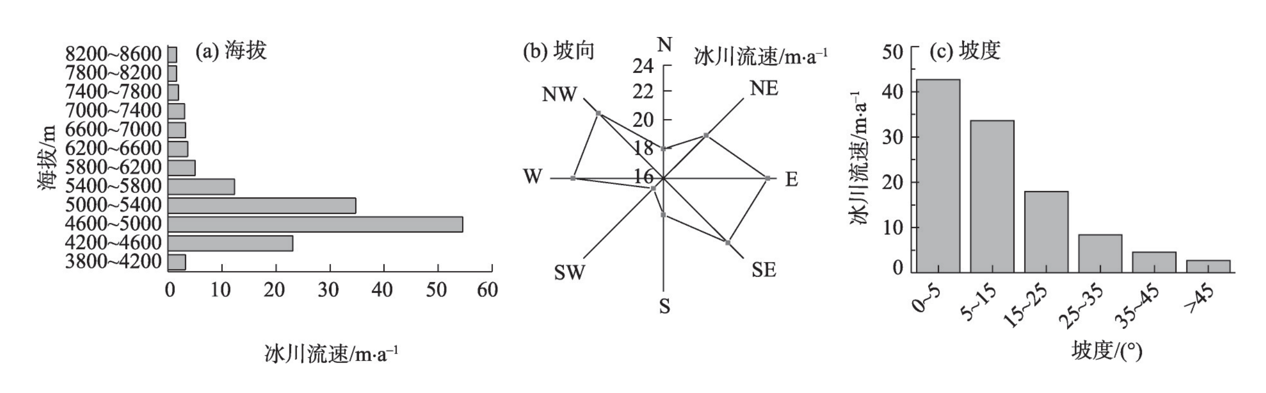


图4 不同地形参数的冰川流速

Fig. 4 Glacier velocity with different topographic parameters

的增大，流速逐渐减小。这与Sam等[15]和张莎莎等[19]的研究结果类似，可能是因为坡度小，利于冰川面积积累，物质交换快，重力分量大，推动冰体快速向下流动。处于东向的冰川流速最大，例如处于东朝向的音苏盖提冰川，平均流速可达21.18 m·a^{-1}；处于西南向的流速最小(17.02 m·a^{-1})。

3.2.2 冰川表面运动速度年际变化特征 根据上文进行的冰川分类，研究不同类型的冰川流速年际变化特征。研究区16条稳定冰川末端没有展现出明显的前进和表面特征的变化。在7期4条稳定冰川1990—2018年中流线流速剖面图(图5)中发现，除了34号冰川有轻微波动外，其他3条冰川年际变化

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

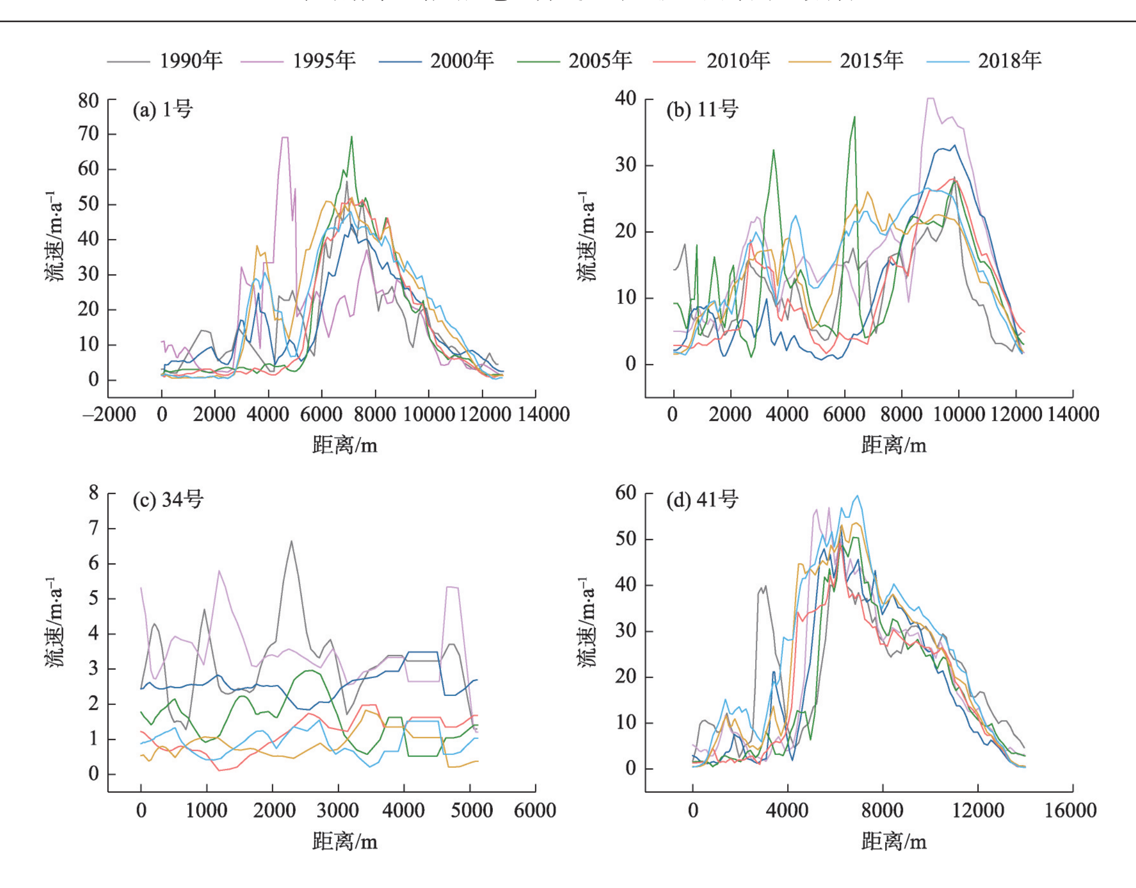


图5　稳定冰川不同年际中流线流速

Fig. 5　Streamline velocities at different interannual periods of stable glaciers

均较稳定。

本文共识别了6条前进冰川，分别是4号、19号、20号、25号、26号、35号冰川。绘制其剖面图(图6)可发现：冰川流速年际变化较大，变化幅度在0~30.00 m·a^{-1}之间，整体呈现不稳定状态。如图7展示了19号和26号冰川末端前进状况。19号冰川在2013—2014年前进距离最大，共94.82 m。26号冰川在1994—2007年发生前进，前进速度可达24.46 m·a^{-1}，其中，1999—2000年前进距离最大，前进速度可达71.80 m·a^{-1}。

退缩冰川(图8)12号冰川在1993—1996年之间发生退缩，可以发现其流速波动变化，变化幅度在0~12.00 m·a^{-1}之间，整体呈不稳定。

跃动冰川有2种行为特征。一种是末端没有发生前进的，一种是末端发生前进的[43]。如图9~10所示：部分末端稳定的冰川在积累区或消融区表现出明显的跃动。例如0号和10号冰川。0号冰川在距冰川顶端1000~2000 m之间的消融区位置流速大于100.00 m·a^{-1}，并在该区出现年际差异，其表现为1990年和2010年流速大于其他年份流速，而其他年份流速保持一致。10号冰川在距顶端10000~20000 m之间年际变化较大，其中，该条冰川在1995和2015年各发生一次跃动，跃动时峰值流速可达320.00 m·a^{-1}，而其余年份流速在100.00 m·a^{-1}以下。2号冰川和17号冰川在积累区年际变化较大。2号冰川距顶端5000~15000 m之间年际变化较大，2000年流速达到了最低，1990、2015年和2018年流速在距顶端7500~12000 m之间都超过100.00 m·a^{-1}，说明该条冰川至少发生了3次跃动。不同冰川不同位置年际流速变化均有差异。17号冰川年际变化较复杂，该条冰川在距顶端5000~25000 m之间年际变化较大，而在距顶端25000 m到冰川末端年际变化稳定，且不同年份的流速时空变化一致。其中，1995年和2015年冰川在距顶端5000~15000 m之间发生了2次跃动；1990年和2010年冰川在距顶端15000~25000 m之间也各发生一次跃动。5号和9号冰川年际变化较小。27号、39号、40号冰川年际变化较大，但流速峰值出现的位置与往年大致相同。39号冰川在2015年和2018年发生过2次跃动，跃动周期小，跃动前端基本未变，但冰川表面特征

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

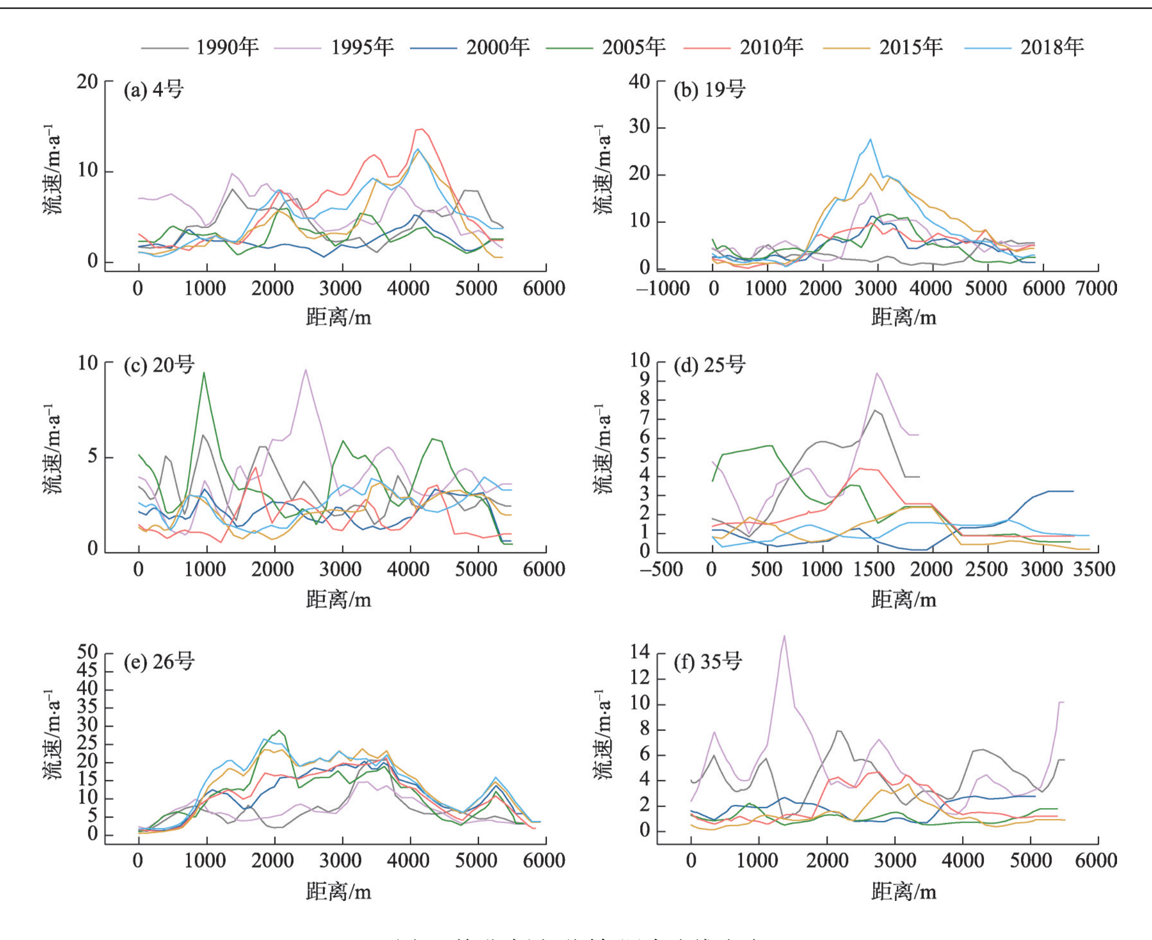


图6 前进冰川不同年际中流线流速

Fig. 6 Streamline velocities at different interannual periods of advancing glaciers

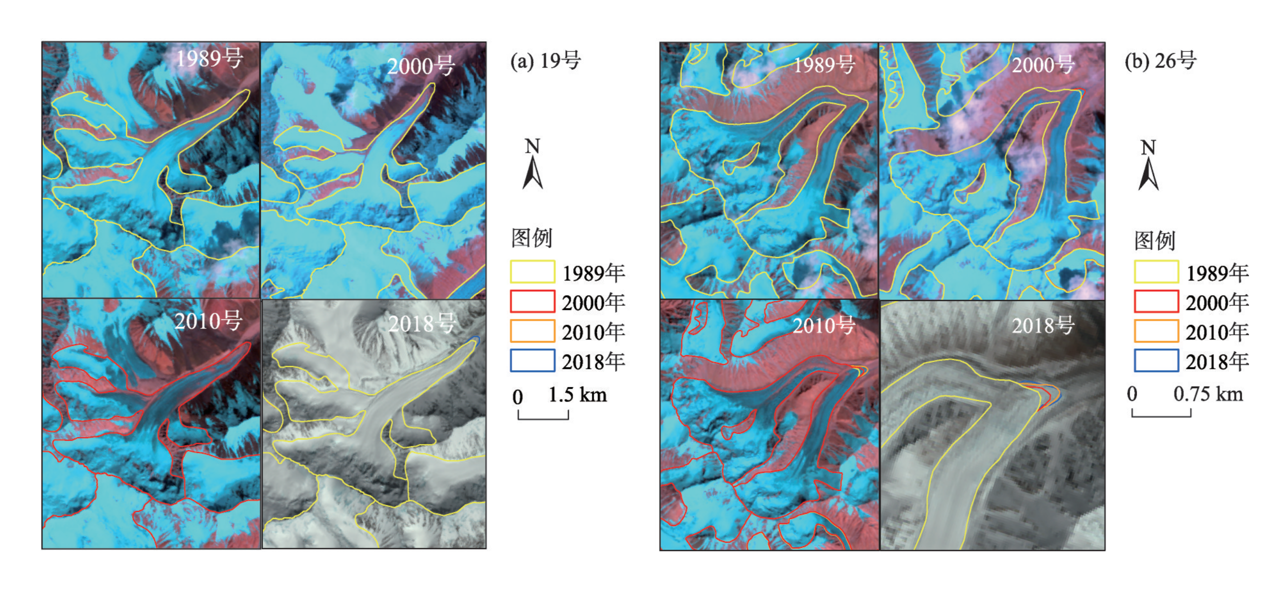


图7 典型冰川前进现象

Fig. 7 Typical glacial advance phenomena

发生变化，运动将冰与表碛的混合物向下输送[43]。末端发生前进的冰川，大多是中规模的冰川，例如7号、18号、22号、28号、29号、30号、33号、37号。这类冰川中流线流速的年际变化不大，在0~20.00 m·a⁻¹之间变化，整体呈现不稳定现象。尽管这类冰川表面流速较小，但其末端运动速度较大，会发生几百

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

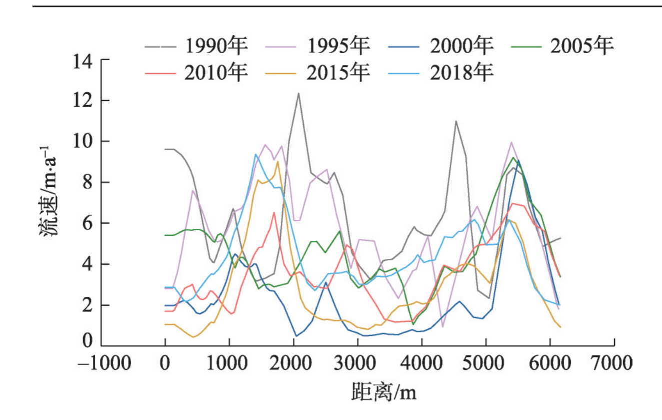


图8 退缩冰川12号冰川不同年际中流线流速

Fig. 8 Streamline velocities at different interannual periods of retreating glacier No.12

米的前进。如图11展示了典型跃动冰川在1989—2018年的末端加速情况。如33号冰川，跃动启动时间在1993年，结束在2018年，跃动期可达25 a，末端在2018年至往后仍有继续前进的趋势。37号冰川跃动启动时间在1993年，结束在2010年，跃动期可达27 a，峰值速度出现在2009—2010年之间，流速达到586.84 m·a^{-1}。

4 讨 论

4.1 冰川规模与流速

从表2可得：研究区面积在1.71~359.05 km^{2}之间变化。跃动冰川主要发生在面积大于5 km^{2}以上的冰川，而稳定冰川多集中在面积在2.0~5.0 km^{2}之间的冰川。面积大于100 km^{2}的冰川有4条，平均流速分别为32.82 m·a^{-1}、38.80 m·a^{-1}、21.18 m·a^{-1}、16.95 m·a^{-1}；面积分布在50~100 km^{2}之间的冰川有3条，平均流速分别为25.30 m·a^{-1}、13.73 m·a^{-1}、35.05 m·a^{-1}。这7条冰川的流速都大于面积<50 km^{2}的冰川的流速。跃动冰川的长度一般要大于其他3类冰川，即冰川跃动更容易发生在长度更长的冰川上，而跃动冰川的流速要大于稳定冰川流速。冰川规模与表面流速具有一定的关系。面积大的冰川有大面积的积累区，积累区有丰富的冰川物质，促使冰川向前运动。因此，面积大的冰川流速较大。

4.2 气候对冰川流速的控制

井哲帆等[6]通过对冰川形态、物质平衡、气候条件、冰川面积和厚度等影响冰川运动的因子进行通径分析，得到影响冰川运动速度的因子相互影响，其中直接影响冰川运动速度的因子是冰川形态，而气候因素则是非常重要的间接因素，通过气候的变化影响物质平衡，从而作用于冰川形态以及一系列冰内结构与应力影响冰川运动速度。不同的地理位置，不同的冰川，其影响运动速度的因素是不相同的。气候因素是控制因子，气候的变化控制着冰川的运动状态。

喀喇昆仑山北坡所处的地理位置特殊，受到西风环流和印度洋西南季风影响，冬、夏两季会有大量的降水，降水对冰川物质的积累有重要的影响。我们通过许艾文等[23]的研究得到，1960—2013年各站点降水量逐渐增加，年均气温与夏季气温都呈现显著上升趋势。虽然整体趋势相同，但变化幅度也有差异。冰川发育的条件相比来说会影响冰川的发育及稳定状态，如果破坏了这种稳定平衡的发育条件，就极有可能造成冰川的不稳定。因此，喀喇昆仑山的这种气候变化差异是造成一部分地区冰川不稳定、不平衡，从而发生前进或跃动的主导因素。冰川运动受气候控制，最直观的现象就是冰川流速的季节性变化。当降水增加，冰川积累增加，厚度增加，推进冰川运动。当气温升高时，冰川融水增加，促进底部滑动，影响冰川流速。研究区冰川流速在1989—2018年呈增大趋势。这与研究区增加的降水与气温关系密不可分。

4.3 冰川跃动机制

冰川跃动是一种复杂的活动，至今未有对其机制的统一解释[26,49]。现有研究对喀喇昆仑山冰川跃动的原因有不同看法，认为喀喇昆仑山冰川跃动受热力学和水文条件控制。井哲帆等[6]指出气候因素是控制因子，气候的变化控制着冰川的运动状态。但从Rankl等[22]和Quincey等[25]的研究结果可以得到，喀喇昆仑山存在较多的跃动型冰川，这种冰川本身也会引起局部冰川条件的改变。冰川跃动也有可能是冰川内部或底部岩石受到冰体挤压，以及水文条件引起冰温变化的综合作用。当冰面坡度较大时，发生崩裂，向下滚落，造成整个冰体不稳定，从而快速下滑造成冰流速度增大而发生跃动。

5 结 论

本文利用ITS_LIVE、Landsat数据提取了研究区42条冰川的表面流速，并将末端运动与表面运动特征结合起来，对比分析了不同运动类型的冰川表面

chinaXiv:202110.00040v1

chinaXiv:202110.00040v1

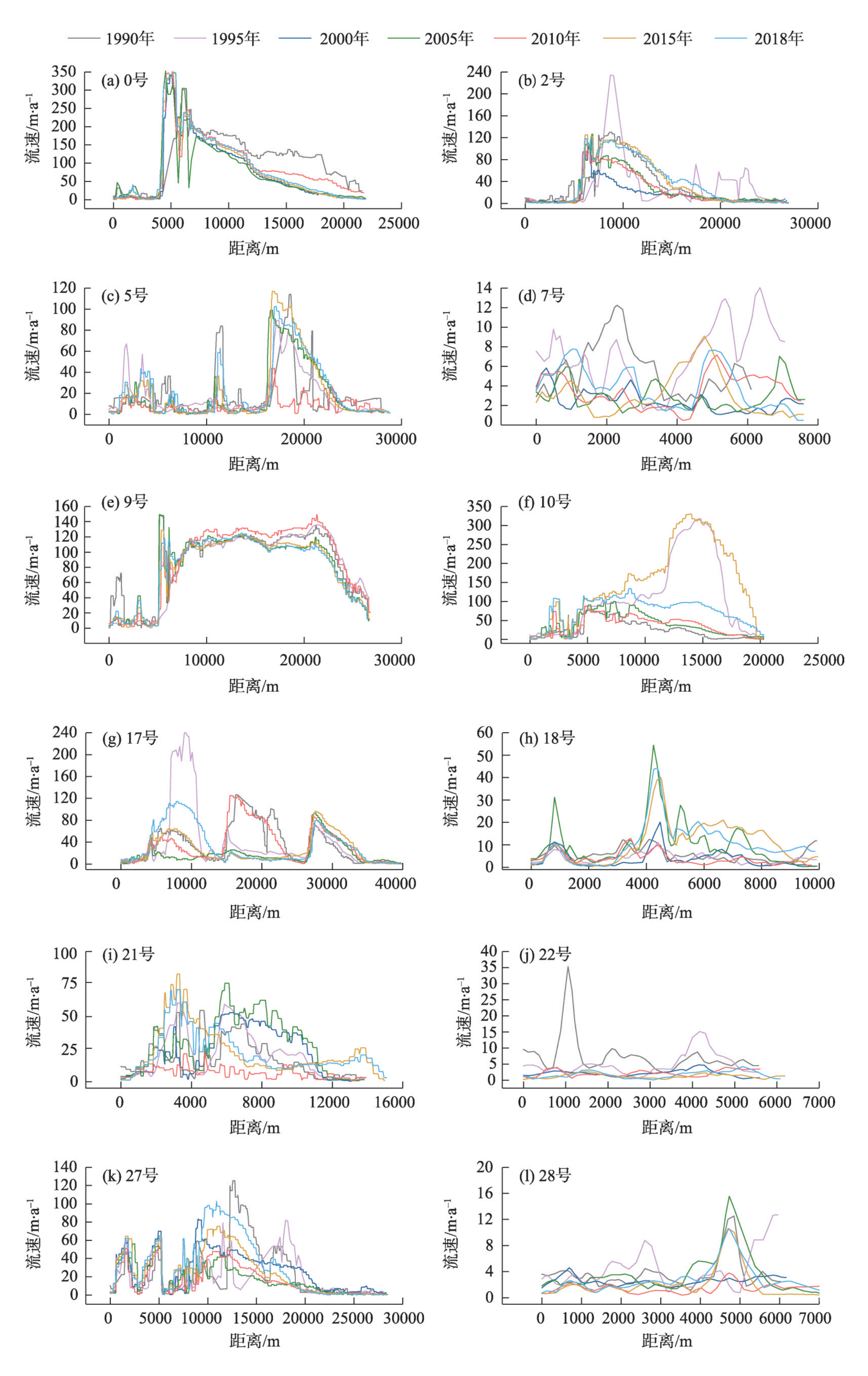


图9 跃动冰川不同年际中的流线流速(冰川序号:0、2、5、7、9、10、17、18、21、22、27、28)

Fig. 9 Streamline velocities at different interannual periods of surging glaciers (glacier numbers: 0、2、5、7、9、10、17、18、21、22、27、28)

ChinaXiv合作期刊

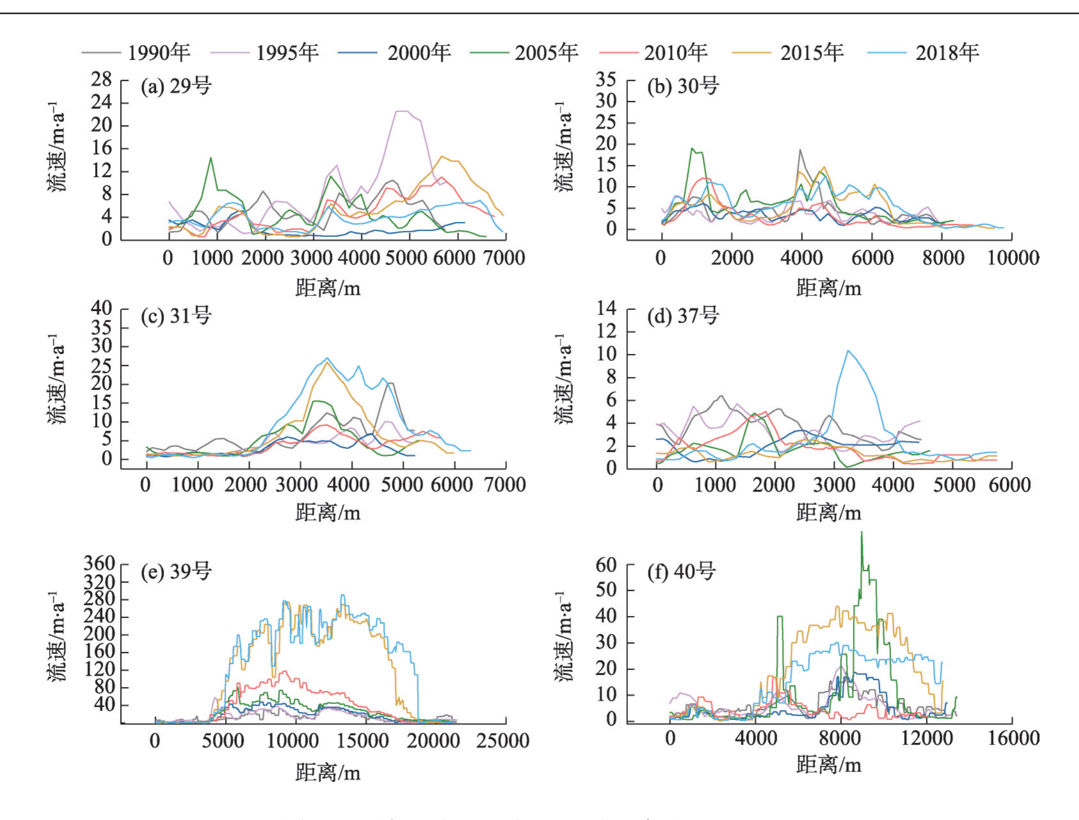


图10 跃动冰川不同年际中的流线流速(冰川序号:29、30、31、37、39、40)

Fig. 10 Streamline velocities at different interannual periods of surging glaciers (glacier numbers: 29、30、31、37、39、40)

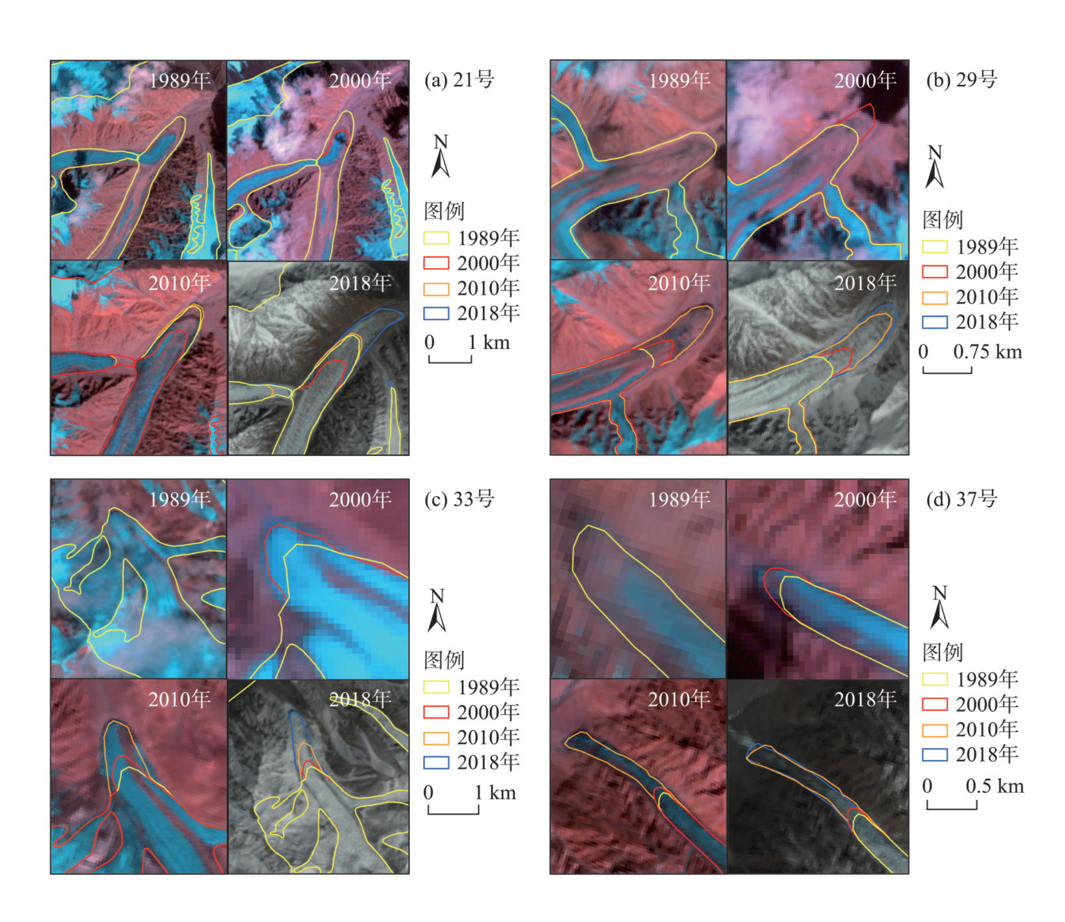


图11 典型冰川跃动现象

Fig. 11 Typical glacier surging phenomenon

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

表2 选取的典型冰川基本信息表

Tab. 2 Basic information for the selected typical glaciers

冰川编号	冰川编码	坡向	面积/km²	长度/km	平均高程/m	平均流速/m·a⁻¹	冰川类型
0	5Y654C0163	NE	107.74	21.98	5670.75	32.82	跃动
1	5Y654C0167	E	32.25	13.83	5587.68	6.38	稳定
2	5Y654C0157	NE	87.83	26.91	5358.23	25.30	跃动
3	5Y654C0136	N	1.71	3.22	5488.77	1.66	稳定
4	5Y654C0045	NW	6.14	5.89	5793.50	3.53	前进
5	5Y654C0145	N	83.82	28.83	5519.46	13.73	跃动
6	5Y654C0135	NE	2.03	3.54	5572.33	2.74	稳定
7	5Y654C0132	NE	10.00	8.42	5574.76	3.32	跃动
8	5Y654C0130	NE	6.16	8.72	5537.67	2.70	稳定
9	5Y654C0128	N	110.35	26.42	5617.93	38.80	跃动
10	5Y654C0116	NE	94.43	20.12	5664.67	35.05	跃动
11	5Y654C0092	N	39.53	14.53	5699.06	7.86	稳定
12	5Y654C0087	NE	6.93	6.81	5807.98	3.54	退缩
13	5Y654D0123	NE	2.34	4.29	5534.80	1.78	稳定
14	5Y654D0122	N	2.72	3.19	5458.10	2.45	稳定
15	5Y654D0119	NE	7.43	5.44	5507.69	2.64	稳定
16	5Y654D0112	NE	9.64	8.15	5443.55	7.30	稳定
17	5Y654D0053	E	359.05	43.16	5377.05	21.18	跃动
18	5Y654D0097	E	19.80	11.37	5660.93	8.24	跃动
19	5Y654D0105	NE	10.16	6.58	5529.76	5.05	前进
20	5Y654D0102	NE	5.92	5.98	5597.82	2.57	前进
21	5Y654D0096	N	27.55	15.10	5418.99	9.69	跃动
22	5Y654D0064	S	8.17	6.85	5756.31	1.38	跃动
23	5Y654D0092	NE	2.41	4.86	5686.01	2.57	稳定
24	5Y654D0089	NE	3.78	5.05	5596.15	2.32	稳定
25	5Y654D0066	S	1.76	3.76	5712.78	1.11	前进
26	5Y654D0087	NE	12.20	6.46	5519.86	9.04	前进
27	5Y654D0048	NE	182.54	27.91	5450.89	16.95	跃动
28	5Y654D0048	E	8.54	8.08	5509.20	2.56	跃动
29	5Y654D0077	NE	11.92	7.65	5524.96	2.88	跃动
30	5Y654D0068	SE	10.09	10.64	5792.27	4.39	跃动
31	5Y654D0073	N	3.26	5.15	5569.96	1.29	稳定
32	5Y654D0072	NE	2.41	4.57	5503.74	0.64	稳定
33	5Y654D0033	NW	11.14	7.03	5826.72	5.42	跃动
34	5Y654D0032	NW	4.50	5.54	5945.17	1.25	稳定
35	5Y654D0027	N	3.37	5.53	5660.38	1.67	前进
36	5Y654D0026	NW	2.13	4.46	5849.63	0.95	稳定
37	5Y654D0023	NW	3.43	6.34	5475.77	1.92	跃动
38	5Y654D0022	N	1.73	3.87	5438.58	1.45	稳定
39	5Y654D0016	NE	74.68	21.31	5778.15	31.95	跃动
40	5Y654D0016	N	16.44	12.74	5721.73	7.57	跃动
41	无	N	38.03	15.37	5511.19	11.29	稳定

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202110.00040v1

流速时空变化。得到如下结论：

（1）1989—2018年，研究区42条冰川中，存在稳定冰川16条、前进冰川6条、退缩冰川1条、跃动冰川19条。在此期间，仍未停止前进的冰川有4条。末端前进速度大于100.00 m·a^{-1}的冰川有11条；前进速度大于200.00 m·a^{-1}的有8条；前进速度大于300.00 m·a^{-1}的有8条。前进期短则1 a，长则24 a，发生前进的时间主要集中在近10 a。

（2）空间上，流速分布符合冰川运动一般原理，可在积累区和冰舌上部发现明显的高值区域，这些区域多出现在跃动冰川主干或支部，流速大小一般在100.00 m·a^{-1}之上，如在音苏盖提冰川南分支，其最大流速可达到358.33 m·a^{-1}。单条冰川平均流速分布最大的冰川为9号冰川（38.80 m·a^{-1}），分布最小的为32号冰川（0.64 m·a^{-1}）。

（3）整体上，冰川与地形要素的关系密切。流速在海拔4600~5000 m之间达到最大（54.55 m·a^{-1}），是冰川末端流速的10倍以上；分布在坡度0~5°之间的42条冰川平均流速最大，并且随着坡度的增大，流速逐渐减小；处于东向的冰川流速最大，例如处于东朝向的音苏盖提冰川，平均流速可达21.18 m·a^{-1}，处于西南向的流速最小（17.02 m·a^{-1}）。

（4）不同类型的冰川中流线流速年际变化不同。稳定冰川流速年际变化较稳定，不同年份相同位置的流速值较一致；而对于前进冰川和退缩冰川而言，年际流速波动均较大；跃动冰川不同位置年际流速变化不同。末端发生前进的跃动冰川表面流速变化不大，但末端变化速度却可超过100.00 m·a^{-1}，甚至可达到500.00 m·a^{-1}。

（5）长度更长、面积更大的冰川易发生跃动。气候、雪崩和地形也是影响冰川运动速度变大的主要原因。

参考文献（References）

[1] 段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237. [Duan Jianping, Wang Lili, Ren Jiawen, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century[J]. Advances in Earth Science, 2009, 28(2): 231-237.]

[2] 王聪强, 杨太保, 冀琴, 等. 1988—2013年布加岗日地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 70-76. [Wang Congqiang, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Variation of glacier and its response to climate change in the Bujiagangri region from 1988 to 2013[J]. Resarch of Soil and Water Consearvation, 2016, 23(4): 70-76.]

[3] 秦艳, 杨太保, 冀琴, 等. 1973—2016年哈尔里克山现代冰川变化分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 569-576. [Qing Yan, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Changes in the modern glaciers of Harlik Mountains from 1973—2016[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(5): 569-576.]

[4] 王晶, 杨太保, 冀琴, 等. 1990—2015年喜马拉雅山东段中国和不丹边境地区冰川变化研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 542-550. [Wang Jing, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Change of modern glaciers in the eastern Himalaya near China and Bhutan border area from 1990 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 542-550.]

[5] 叶庆华, 程维明, 赵永利, 等. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 920-930. [Ye Qinghua, Cheng Weiming, Zhao Yongli, et al. A review on research of glacier changes on the Tibetan Plateau by remote sensing technologies[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(7): 920-930.]

[6] 井哲帆, 刘力, 周在明, 等. 冰川运动速度影响因子的强度分析——以祁连山七一冰川为例[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1222-1228. [Jing Zhefan, Liu Li, Zhou Zaiming, et al. Analysis on the influencing factors of glacier flow velocity: A case study of Qiyi glacier in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1222-1228.]

[7] 井哲帆, 周在明, 刘力. 中国冰川运动速度研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 749-754. [Jing Zhefan, Zhou Zaiming, Liu Li, et al. Progress of the research on glacier velocity in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 749-754.]

[8] 周在明, 井哲帆, 赵淑惠, 等. 冰川运动速度对气候变化的响应——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 237-244. [Zhou Zaiming, Jing Zhefan, Zhao Shuhui, et al. The response of glacier velocity to climate change: A case study of Urumqi glacier No.1[J]. Journal of Earth Science, 2010, 31(2): 237-244.]

[9] 井哲帆, 叶柏生, 焦克勤, 等. 天山奎屯河哈希勒根51号冰川表面运动特征分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 563-566. [Jing Zhefan, Ye Baisheng, Jiao Keqin, et al. Surface velocity on the glacier No.51 at Haxilegen of the Kuytun River, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 563-566.]

[10] 曹泊, 王杰, 潘保田, 等. 祁连山东段宁缠河1号冰川和水管河4号冰川表面运动速度研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1428-1435. [Cao Bo, Wangjie, Pan Baotian, et al. Surface flow velocity of Ningchanhe No.1 and Shuiguanhe No.4 glaciers in the east Qilian Moutains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1428-1435.]

[11] 刘宇硕, 秦翔, 杜文涛, 等. 祁连山冷龙岭宁缠河3号冰川表面流速特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 834-840. [Liu Yushuo, Qin Xiang, Du Wentao, et al. An analysis of flow features of

ChinaXiv合作期刊

the Ningchan River glacier No.3 in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 834-840.]
[12] 王仕哲, 柯长青. 基于特征跟踪方法的喜马拉雅山冬季冰川流速估算[J]. 高技术通讯, 2018, 28(3): 257-268. [Wang Shizhe, Ke Changqing. Estimation of the Himalayas' winter glacier velocity based on feature tracking[J]. High Technology Letter, 2018, 28(3): 257-268.]
[13] 王欣, 刘琼欢, 蒋亮虹, 等. 基于SAR影像的喜马拉雅山珠穆朗玛峰地区冰川运动速度特征及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 570-579. [Wang Xin, Liu Qionghuan, Jiang Lianghong, et al. Charateristics and influence factors of glacier surface flow velocity in the Everest region, the Himalayas derived from AlOS/PALSAR images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 570-579.]
[14] 王仕哲, 柯长青. 基于ALO SPALSAR的喜马拉雅山冰川流速分布及变化[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 942-955. [Wang Shizhe, Ke Changqing. Distribution and variation of glacier velocity in Himalayas based on ALOS PALSAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 942-955.]
[15] Sam L, Bhardwaj A, Kumar R, et al. Heterogeneity in topographic control on velocities of western Himalayan glaciers[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12843, doi: 10.1038/s41598-018-31310-y.
[16] Kumar V, Venkataramana G, Høgda K A. Glacier surface velocity estimation using SAR interferometry technique applying ascending and descending passes in Himalayas[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(4): 545-551.
[17] 王仕哲. 青藏高原冰川流速估算[D]. 南京: 南京大学, 2019. [Wang Shizhe. Estimation of glacier velocity over Tibetan Plateau [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.]
[18] 孙作哲. 喀喇昆仑山区的冰川运动速度测量[J]. 冰川冻土, 1979, 1(2): 33-38, 51. [Sun Zuozhe. Measurement of glacier velocity in the Karakoram Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1979, 1(2): 33-38, 51.]
[19] 张莎莎, 张震, 刘时银, 等. 喀喇昆仑山西北部冰川运动速度地形控制特征[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1015-1025. [Zhang Shasha, Zhang Zhen, Liu Shiyin, et al. Topographic control characteristics of glacier velocity in Hunza River Basin of Karakoram Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1015-1025.]
[20] Sun Y L, Jiang L M, Liu L, et al. Spatial-temporal characteristics of glacier velocity in the central Karakoram revealed with 1999—2003 Landsat-7 ETM+ pan images[J]. Remote Sensing, 2017, 9 (10): 1-20.
[21] 刘凯, 王宁练, 白晓华. 1993—2015年喀喇昆仑山努布拉流域冰川变化遥感监测[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 710-719. [Liu Kai, Wang Ninglian, Bai Xiaohua. Variation of glacier in the Nubra Basin, Karakoram Mountains, revealed by remote sensing images during 1993—2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 710-719.]
[22] Rankl M, Kienholz C, Braun M. Glacier changes in the Karakoram region mapped by multimission satellite imagery[J]. 2014, 8(3): 977-989.
[23] 许艾文, 杨太保, 王聪强, 等. 1978—2015年喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化的遥感监测[J]. 地理科学进展, 2016, 35(7): 878-888. [Xu Aiwen, Yang Taibao, Wang Congqiang, et al. Variation of glaciers in the Shaksgam River Basin, Karakoram Mountains during 1978—2015[J]. Advances in Earth Science, 2016, 35 (7): 878-888.]
[24] 许艾文, 杨太保, 冀琴, 等. 乔戈里峰北坡冰川跃动遥感监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 145-152. [Xu Aiwen, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Monitoring recent surging on the northern slope glaciers of Qogir through remote sensing[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(2): 145-152.]
[25] Quincey D J, Braun M, Glasser N F, et al. Karakoram glacier surge dynamics[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18), doi: 10.1029/2011GL049004.
[26] Duncan J Q, Neil F G, Simon J C, et al. Heterogeneity in Karakoram glacier surges[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, 120(7): 1288-1300.
[27] Farinotti D, Walter W I, Remco J de K, et al. Manifestations and mechanisms of the Karakoram glacier anomaly[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(1): 8-16.
[28] Mayer C, Fowler A C, Lambrecht A, et al. A surge of north Gasherbrum glacier, Karakoram, China[J]. Journal of Glaciology, 2011, 57 (205): 904-916.
[29] Ding M H, Huai B J, Sun W J, et al. Surge-type glaciers in Karakoram Mountain and possible catastrophes alongside a portion of the Karakoram Highway[J]. Natural Hazards, 2018, 90(2): 1017-1020.
[30] Bhambri R, Hewitt K, Kawishwar P, et al. Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram[J]. Scientific Reports, 2017, 7(221): 332-340.
[31] 康建成, 何元庆. 喀喇昆仑山克勒青河上游地区冰川的初步探究[J]. 冰川冻土, 1990, 12(4): 319-325. [Kang Jiancheng, He Yuanqing. The preliminary study on existing glaciers located in the upper region of Saksgam River, Karakoram Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(4): 319-325.]
[32] Haireti A, Tateishi R, Alsaaideh B. Multi-criteria technique for mapping of debris-covered and clean-ice glaciers in the Shaksgam Valley using Landsat TM and ASTER GDEM[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(4): 703-714.
[33] 康建成, 何元庆. 喀喇昆仑山克勒青河谷冰川冰岩界面特征的初步研究[J]. 冰川冻土, 1991, 13(4): 331-336. [Kang Jiancheng, He Yuanqing. Characteristic at boundary face of ice-bedrock on the upper region of Shaksgam Valley, Karakoram[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1991, 13(4): 331-336.]
[34] 孙永玲, 江利明, 柳林, 等. 基于Landsat-7 ETM+SLC-OFF影像的山地冰川流速提取与评估——以Karakoram锡亚琴冰川为

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

例[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 596-603. [Sun Yongling, Jiang Limming, Liu Lin, et al. Surface flow velocity of mountain glacier derived from Landsat-7 ETM+SLC-OFF images: Extraction and quantitative evaluation: A case study of the Siachen glacier in the Karakoram[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 596-603.]

[35] Gardner A S, Fahnstock M S, Cambos T. ITS_LIVE regional glacier and ice sheet surface velocities[EB/OL]. [2021-03-04]. https://its-live.jpl.nasa.gov.

[36] 陈杰, 杨太保, 冀琴, 等. 1976—2014年爬努河流域冰川变化对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(9): 171-175. [Chen Jie, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Glacier in response to climate change in the Panuhe Basin, Tibet from 1976 to 2014[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(9): 171-175.]

[37] 吴坤鹏, 刘时银, 鲍伟佳, 等. 1980—2015年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 24-34. [Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Bao Weijia, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 24-34.]

[38] 胡凡盛, 杨太保, 冀琴, 等. 近25 a布喀达坂峰冰川变化与气候的响应[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 66-73. [Hu Fansheng, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Response of glacier in the Bukatage Mountains to climate change from 1990 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 66-73.]

[39] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1972—2013年东天山博格达峰地区冰川变化遥感监测[J]. 地理科学, 2015, 35(7): 925-932. [He Yi, Yang Taibao, Chen Jie. Remote sensing detection of glacier changes in Dong Tianshan Bogda region in 1972—2013[J]. Earth Science, 2015, 35(7): 925-932.]

[40] 何毅, 闫浩文, 杨宇雷, 等. 近期哈尔里克山脉冰川变化遥感监测[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 358-366. [He Yi, Yan Haowen, Yang Yulei, et al. Dynamic monitoring of glacier change in Hal Rick Mountain[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 358-366.]

[41] 刘娟, 姚晓军, 刘时银, 等. 1970—2016年冈底斯山冰川变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1333-1344. [Liu Juan, Yao Xiaojun, Liu Shiyin, et al. Glacier changes in the Gangdisê Mountains from 1970 to 2016[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1333-1344.]

[42] 牛生明, 李忠勤, 怀保娟. 遥感影像提取冰川信息方法研究[J]. 中国西部科技, 2014, 13(8): 1-3. [Niu Shengming, Li Zhongqin, Huai Baojuan. Study on the remote sensing image extraction methods in glaciers area[J]. Science and Technology of West, 2014, 13(8): 1-3.]

[43] Lü M Y, Guo H D, Lu X C, et al. Characterizing the behaviour of surge-and non-surge-type glaciers in the Kingata Mountains, eastern Pamir, from 1999 to 2016[J]. The Cryosphere, 2019, 13(1): 219-236.

[44] 张震, 刘时银, 魏俊锋, 等. 新疆帕米尔跃动冰川遥感监测研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 11-20. [Zhang Zhen, Liu Shiyin, Wei Junfeng, et al. Monitoring recent surging of Karayaylak glacier in Pamir by remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 11-20.]

[45] Grant K L, Stokes C R, Evans I S. Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(194): 960-972.

[46] Lü M Y, Guo H D, Yan J, et al. Distinguishing glaciers between surging and advancing by remote sensing: A case study in the eastern Karakoram[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 2297, doi: 10.3390/rs12142297.

[47] 韩艳飞. 基于Landsat遥感影像的西昆仑冰川变化监测与流速估算研究(1977—2013)[D]. 南京: 南京大学, 2015. [Han Yanfei. Research on glacier change in the west Kunlun Mountains and flow velocity estimation based on landsat images (1977—2013)[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.]

[48] 张聪, 姚晓军, 张大弘. 2016年阿尔金山冰川边界及长度数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2020, 5(2): 166-175. [Zhang Cong, Yao Xiaojun, Zhang Dahong. A dataset of boundary and length of glaciers in the Altun Mountains in 2016[J]. Scientific Data in China (Chinese and English online), 2020, 5(2): 166-175.]

[49] 许艾文. 近40年中国喀喇昆仑山冰川变化的遥感监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Xu Aiwen. Monitoring glacier change based on remote sensing in China Karakoram for the last four dacades[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

chinaXiv:202110.00040v1

ChinaXiv合作期刊

Characteristics of major glacial movements on the northern slope of K2, Karakoram

LI Haijuan, LIU Shiyin, WU Kunpeng

(Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: The surface velocity of 42 glaciers on the northern slope of K2 (Mount Qogir), Karakoram was extracted from ITS_LIVE and Landsat data. Combined with data regarding the characteristics of end and surface movements, the spatial and temporal variations of the surface velocity of glaciers with different movement types were analyzed and compared. The results show that (1) from 1989 to 2018, among the 42 glaciers in the study area, we observed 16 stable, 6 advancing, 1 retreating, and 19 surging glaciers. The velocity distribution in space is consistent with the general principle of glacier movement, and obvious high-value areas can be found in the accumulation area and upper region of the glacier tongue; these areas are mostly in the trunk or branch of the active glacier, and the velocity is generally >100.00 $m \cdot a^{-1}$. For example, in the southern branch of the Yengisogat glacier, the maximum velocity can reach 358.33 $m \cdot a^{-1}$. (2) The glacier velocity distribution is closely related to topographical factors. The maximum flow velocity (54.55 $m \cdot a^{-1}$) is between 4600 m and 5000 m, which is >10 times that of the end of the glacier. The average velocity of the 42 glaciers in the slope angle range of 0° to 5° is the highest, and the velocity decreases with the increase of the slope angle. Glaciers flowing toward the east have the greatest flow rate, and those that flow toward the southwest have the smallest. (3) The interannual variation of the velocity of the stable glacier is small, and the velocity values at the same location are consistent across different years. For advancing and retreating glaciers, the fluctuation in interannual velocity is large. The annual velocity variation of the surging glacier is found to be location dependent. The surface velocity of the glacier with a moving tip shows little change, but the change velocity of the glacier tip can be >100.00 $m \cdot a^{-1}$ and even up to 500.00 $m \cdot a^{-1}$. (4) Glaciers with longer lengths and larger areas are prone to surge. Climate, avalanches, and topography also play a major role in determining glacier speed.

Key words: glacier; the northern slopes of the Karakoram Mountains; ITS_LIVE data; Landsat data; surface velocity; the spatial and temporal variations

chinaXiv:202110.00040v1